

一种数字孪生背景下的组合秤仿真技术

孙国锋 丁金华

(大连工业大学 机械工程学院 大连 116000)

摘 要: 为满足数字孪生(Digital Twin)要求下的组合秤仿真实时性,提出了一种以中间转换板为桥梁的通讯与仿真方式。在该方式中,组合秤控制信号由控制板发出,被中间转换板捕捉到,然后在转换板中将信号转换后发送给上位机。上位机 Unity3D 平台上构建的组合秤模型识别转换板发来的数据,并由此对真实的组合秤进行运动仿真。为准确获取控制信号,在转换板上利用中断对信号进行捕捉,之后将信号变为固定格式的数据通过以太网发送给上位机。为仿真组合秤运动,利用 Unity3D 中 Physics 系列组件保证运动准确。最后对比分析了组合秤仿真过程中的传输速度。此外,该仿真方式也可用于高频脉冲驱动的机器人、组合机床等机械的仿真,以实现数字孪生。

关键词: 数字孪生;组合秤;仿真;Unity3D;Physics 组件

中图分类号: TP23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.99

A simulation technology of combination weighers on Digital Twin

Sun Guofeng Ding Jinhua

(School of Mechanical Engineering, Dalian Polytechnic University, Dalian 116000, China)

Abstract: A communication and simulation method with an intermediate conversion board as a bridge is proposed to meet the real-time performance and accuracy of the combination weigher simulation in Digital Twin. At first, the control signal of the machinery was sent out by the control board and captured by the intermediate conversion board and then the signal in it was converted and sent to the upper computer. Finally, the model of combination weigher built on the Unity3D in the host computer recognized the data from the conversion board, and thus performed motion simulation of the real machine. To obtain the control signal accurately, the signal was captured by the interrupt on the conversion board, and converted as a fixed format to the upper computer through the Ethernet. To simulate the movement of the combination weigher, the Physics component in Unity3D is used to ensure accurate movement. Finally, the transmission speed in the simulation process of the combination weigher was compared and analyzed. In addition, this method can also be used to simulate high-frequency pulse-driven robots, modular machine tools and other machinery.

Keywords: Digital Twin; combination weigher; simulation; Unity3D; Physics component

0 引 言

数字孪生是当今最热门的数字化技术和应用领域之一^[1]。数字孪生在虚拟环境中复现了产品和生产系统,使得产品和生产系统的数字空间模型和物理空间模型处于实时交互中,使二者能够及时地掌握彼此的动态变化并实时作出响应^[2]。这就要求数字空间模型对物理空间模型的变化反应时间很短,数据交互速度很快,而在 Unity3D 中采用文献[3-4]中的方法对实际机械设备进行虚拟映射时,虚拟设备常会出现滞后甚至失真的情况。

组合秤作为自动化包装生产线的重要组成部分,其料

斗开合的动力一般由步进电机提供。控制系统每发送一个脉冲信号,步进电机转动一个角度^[5],随着脉冲数增加,步进电机转过的角度随之增大,带动传动装置将料斗打开或关闭。为保证称量的快速性(即快速开合料斗),步进电机脉冲信号传输速度要求较快,而且为防止步进电机失步和过冲,常需要变换控制频率^[6],这进一步对脉冲信号传输的准确性与实时性提出更高要求,所以对组合秤进行数字孪生的仿真技术研究具有较为代表性的意义。本文设计了一种组合秤仿真方法,使 Unity3D 中的虚拟设备和实际机械设备同时运动,响应时间短,同时该方法可适用于机器人、组合机床等高速脉冲驱动的设备。

1 组合秤工作原理

组合秤结构如图 1 所示。

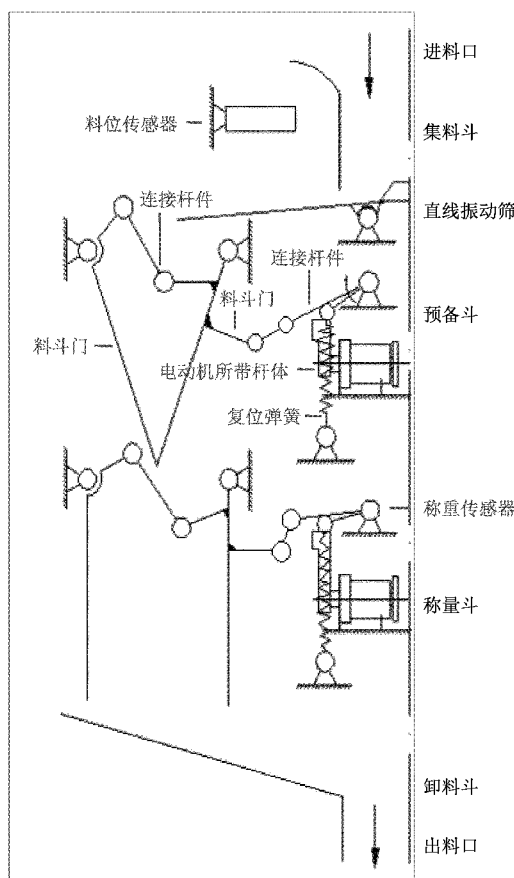


图 1 组合秤结构

组合秤机械结构从上至下分别为集料斗、直线振动筛、预备斗、称量斗、卸料斗^[7]。预备斗与称量斗构成称重单元。共有 10 个预备斗和 10 个称重斗。每个预备斗或称量斗有 1 个步进电机为其开合提供动力。每个步进电机有 1 个步进电机位置传感器,用于校正步进电机位置。每完成一次工作流程后,控制器通过传感器检查各步进电机是否处在起始位置,若不在,则对中步进电机,使其运动至起始位置(步进电机位置传感器所在位置)。

物料首先由输送机从进料口送入组合秤,经集料斗、直线振动筛进入预备斗^[8]。若称量斗内物料质量为 0,则预备斗对其补料。然后称量斗下的称重传感器对物料质量采集完毕后,将质量数据送入控制器并在内部进行质量组合运算。最后,质量组合成功的称量斗开合一次,将物料送入卸料斗。具体工作流程如图 2 所示。

2 组合秤仿真过程

仿真系统结构如图 3 所示。

为使上位机虚拟组合秤接收真实控制系统发出的控制信号,同时不额外占用控制板通信端口,构建一个转换板用

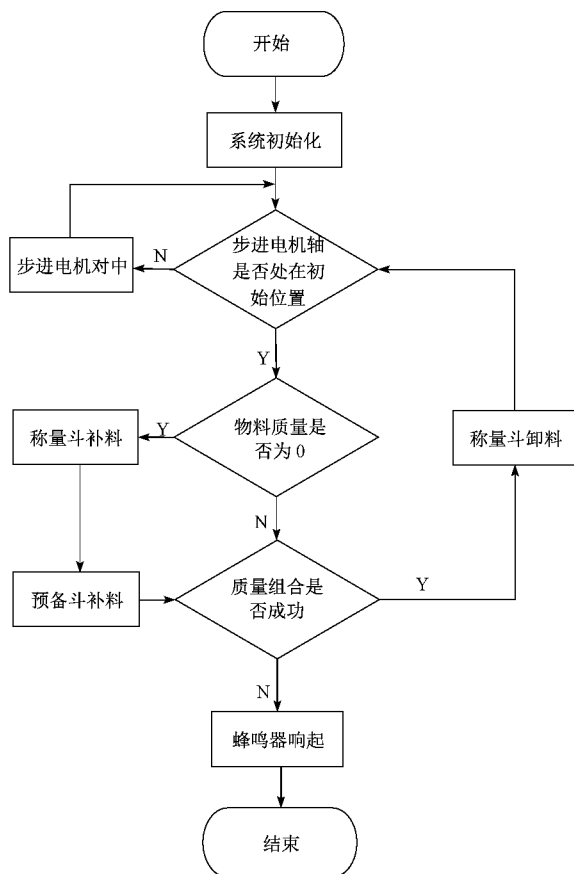


图 2 工作流程

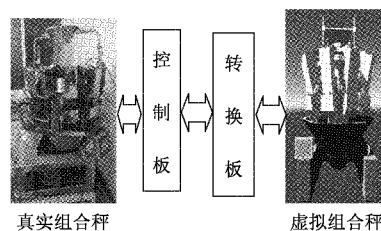


图 3 仿真系统结构

于与控制板进行电气连接,接收控制板发出的控制信号,并通过网口与上位机通信,进而控制上位机 Unity3D 中虚拟组合秤运行。

2.1 转换板通信过程

由于组合秤控制板输出信号主要为步进电机脉冲信号,其频率一般较高。为防止步进电机过冲和失步,脉冲信号频率往往需多次调整^[9]。为保证转换板捕捉步进电机脉冲信号的准确性与快速性,转换板的控制器 (STM32F103zet6) 通过外部中断捕捉控制板发出的信号。进入中断函数立即写入即将发出的数据,并在主函数将数据通过以太网发送至上位机,防止脉冲信号捕捉过程中,用于传递脉冲信号的数据由于发送不及时被覆盖^[10],造成数据丢失。

转换板发送数据存在两种方式。第 1 种是向上位机发

送脉冲的数量,即当捕捉到一次上升沿时,进入中断函数将表示对应的跳变来源的步进电机脉冲数的数据加 1,然后立即向上位机发送该数据,上位机通过计算和上一次数据的差值计算虚拟组合秤的步进电机轴转动的角度驱动其运动。第 2 种是向上位机发送脉冲,即当捕捉到一次上升沿时将要发送的数据对应的位置 1(捕捉不到时为 0),然后立即向上位机发送该数据,上位机通过读取这个位上的跳变,驱动虚拟组合秤中的步进电机轴转动 1 个步距角,带动组合秤零件运动。

本文采用的是第 2 种方式。第 1 种方式至少 1 Byte 才可以代表 1 个步进电机的运动状态,并需要考虑长时间工作时脉冲数量溢出问题。第 2 种方式每个字节可以代表 8 个步进电机的运动状态,在数据发送和接收时可提高效率。

转换板中断函数程序如下所示(以 PA4 引脚对 7 号步进电机脉冲信号捕捉为例)。

```
void EXTI4_IRQHandler()
{
    if(EXTI_GetITStatus(EXTI_Line4) != RESET)
        //X07 PA4
        {
            data[0] |= (1<<7); //写入要发送的数据
            //清除中断标志位
            EXTI_ClearITPendingBit(EXTI_Line4);
        }
}
```

2.2 上位机通信与仿真

1) 上位机通信

上位机与转换板采用以太网通信。为方便后续添加其他相关设备仿真时(如输送机、包装机等)上位机与其他设备转换板通信,上位机作为服务器端,转换板作为客户端^[11]。

上位机在通信时须实时读取转换板发来的数据,这对上位机的数据读取速度提出较高要求。由于 Unity3D 仿真平台采用 C#.net 框架程序^[12],其无法采用 while 等死循环语句调用数据读取函数(会导致程序崩溃)。并且 C#.net 自带的 System. Timers. Timer 类的最小中断周期为 1 ms^[13],无法适用于传输速度超过 1 K 的脉冲数据读取。

为解决上述问题,自写了一个 Namespace (MicroLibrary),用于构成微秒级 Timer 调用数据读取函数。其内部包括 MicroStopwatch、MicroTimer 以及 MicroTimerEventArgs。

MicroStopwatch 类继承自 System. Diagnostics. Stopwatch 类,提供了 ElapsedMicroseconds 属性,该属性可获取 MicroTimer 开始运行后的微秒数。MicroTimer 类的设计与 System. Timers. Timer 类似,内部有 START/STOP 方法,达到定时器设置的时间后,运行中断函数。MicroTimerEventArgs 类继承自 System. EventArgs,提供一个 object 记录中断函数信息,即记录从使能 Timer 到执

行中断函数的时间长度以及记录中断函数的回调函数。使用时首先进行 Timer 配置,然后编辑中断函数,最后使能 Timer。

为提高数据接收标志位的查询效率,在中断函数中使用 NetorkStream. DataAvailable 对是否收到数据进行判断。采用 Unity3D 中 Debug 方法打印获取到的当前时间,进行实验和调试。

常用数据读取函数分为两种,一种为 NetworkStream. Read,将接收的数据按照固定长度写入一个数组^[14]。另一种为 NetworkStream. ReadByte,将接收的 1 Byte 数据写入变量。由于第 1 种函数在接收数据长度小于固定长度时会进行阻塞式等待,拖慢系统运行效率,所以采用第 2 种函数 NetworkStream. ReadByte。

上位机中断函数如下所示。

```
private void OnTimedEvent(object sender, MicroLibrary.
MicroTimerEventArgs timerEventArgs)
{
    NetworkStream networkStream = new NetworkStream
(socketSend);
    if (networkStream. DataAvailable){
        byte[] buffer = new byte[2];
        if (i == 0){
            //显示进入中断服务函数第 1 次时的时间
            UnityEngine. Debug. Log ("time2:" + DateTime. Now.
ToString("yyyy-MM-dd HH:mm:ss;fff;ffffff"));
        }
        i++;
        buffer[0] = (byte)networkStream. ReadByte();//读取第
1 个字节
        buffer[1] = (byte)networkStream. ReadByte();//读取第
2 个字节
        if (i==5 000){
            //显示进入中断服务函数第 i 次时的时间,此时 i=5 000
            UnityEngine. Debug. Log ("time2:" + DateTime. Now.
ToString("yyyy-MM-dd HH:mm:ss;fff;ffffff"));
        }
        DataContrast(buffer);//识别脉冲并传递数据给运动程序
    }
}
```

2) 上位机仿真

上位机 Unity3D 平台为组件化编程,即通过在模型上添加组件使模型具有组件相应的属性^[15]。

首先在料斗门、步进电机轴及中间传动机构各零件上添加 Physics 系列组件中的 Rigidbody 组件,使其具有物理刚体属性^[16],并添加 FixedJoint 组件连接固定连接的零件。之后在具有相对转动关系的零件添加 HingeJoint 组件使其可以相对转动,最后在步进电机轴与传动机构接触的零件

处添加 CapsuleCollider 组件,以传递动力。

Unity3D 中零件的组件如图 4 所示。(以步进电机连接杆体为例)

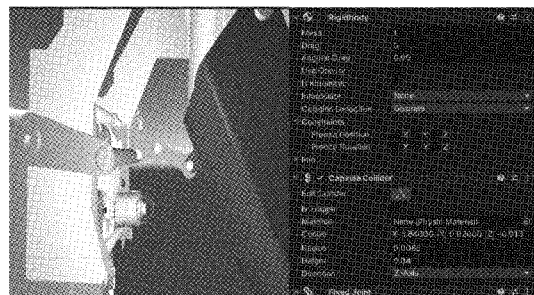


图4 Unity3D 中零件的组件

在仿真时,Unity3D 通信程序识别到转换板发送的 1 个脉冲,然后运动程序控制步进电机轴转动 1 个步距角。步进电机轴随脉冲数量增加逐渐转动,并通过上述组件将动力传给料斗,完成料斗开合。

3 实验结果与分析

由于在组合秤仿真系统中测量单次控制板与 Unity3D 通信时间难以测量,所以采用测量多次取平均值的方式计算单次通信时间。因为控制板与中间转换板采用的是电气连接方式,同时中间转换板采用中断对控制板发来信号进行捕捉,所需时间较短,所以可将中间转换板与上位机的通信时间作为虚拟动画的滞后时间。由于此组合秤共有 20 个步进电机,每帧需要发送 20 位步进电机脉冲数据和 20 位步进电机方向数据,但是由于上层 10 个称量斗和下层 10 个称量斗不可能同时运动,所以每帧需发送 20 位(即 3 Byte)数据。考虑到 CRC 校验需要 8 位,所以每帧长度增加 1 Byte,达到 4 Byte。

在上位机 Unity3D 中,采用图 5 所示的方法,利用 UnityEngine.Debug.Log 函数将识别到的第 1 帧和第 n 帧发来的数据的时间打印出来,取对应的二者差值得到通信总时间(n 取 100、500、1 000、2 000、5 000、10 000、20 000、100 000)。以此分别求出每帧时间与频率。

Unity3D 与转换板通信实验分为每帧 1 Byte 和每帧 4 Byte 两组,以每帧间隔 10 μ s 的方式发送,其结果如表 1 和 2 所示。

表1 Unity3D 与转换板通信结果(每帧 1 Byte)

数据传输量/帧	100	500	1 000	2 000
总时间/ms	10	12	17	51
每帧时间/ μ s	100	24	17	27
频率/Hz	10.01 k	41.67 k	58.81 k	37.04 k
数据传输量/帧	5 000	10 000	20 000	10 000
总时间/ms	192	420	879	4 573
每帧时间/ μ s	38	42	43	45
频率/Hz	36.31 k	23.81 k	23.26 k	22.22 k

表2 Unity3D 与转换板通信结果(每帧 4 Byte)

数据传输量/帧	100	500	1 000	2 000
总时间/ms	11	38	115	264
每帧时间/ μ s	110	76	115	132
频率/Hz	9.09 k	13.16 k	8.70 k	7.58 k
数据传输量/帧	5 000	10 000	20 000	10 000
总时间/ms	717	1 472	2 979	14 969
每帧时间/ μ s	143	147	148	149
频率/Hz	6.99 k	6.80 k	6.76 k	6.71 k

由上述实验结果可知,在转换板每帧发送 4 Byte 数据时,发送频率收敛于 6.7 kHz,每帧时间 0.15 ms。

工作过程中步进电机最高速度时所需传输频率 $f_{\max}$ 计算公式为:

$$f_{\max} = \frac{n \cdot k \cdot v^*}{T} \quad (1)$$

其中, n 为每个工作周期的时长, k 为每 k 个数据帧表示 1 个脉冲, v^* 表示速度系数,由于步进电机在每个工作周期都会经历加速、匀速、减速 3 个过程,所以最高速度不是其平均速度,所以需要进行修正, v^* 值常取 1~2。在本次运动中,为充分保证传输快速性,所以取 v^* 值为 2。在整个组合秤工作周期为 150 ms,步进电机旋转一周经细分后的脉冲数为 200。综上所述, $v^* = 2, n = 200, T = 0.15$ s, $k = 1$ 。将参数值代入式(1)得到: $f_{\max} \approx 2.67$ kHz < 6.71 kHz,满足组合秤工作最高速度的脉冲传输要求。

仿真系统滞后主要由两部分组成,画面刷新时间和画面滞后时间。画面按照 50 Hz 进行刷新,即画面刷新时间为 20 ms,加上画面滞后时间 0.15 ms,约为 20.15 ms,低于文献[17]中的系统滞后的最小值 112 ms。采用本仿真方法系统滞后时间减少 82%。

仿真系统运行结果如图 5 所示(以料斗为例)。

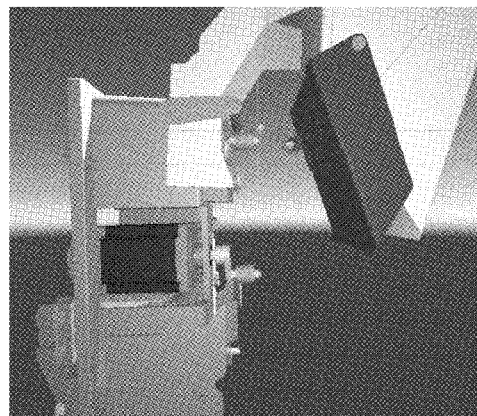


图5 Unity3D 仿真界面运行情况

4 结 论

本文设计一种组合秤仿真方法,采用了中间转换板作

为桥梁,通过网口与上位机进行通信。采用外部中断捕捉控制板发出的脉冲信号,保证控制板信号传输的准确。采用以太网与上位机 Unity3D 通信,提高了数据传输的速率。利用 Unity3D 的物理组件使数字模型具有物理属性,方便运动仿真。满足了数字孪生技术中对于数字空间模型与物理空间模型的对接。同时此方法还可用于机器人、组合机床等采用脉冲信号驱动的机械。

参考文献

- [1] 廖晓红. 数字孪生及其应用跟踪[J]. 广东通信技术, 2019,39(7): 13-16.
- [2] 孙敏. “数字孪生”改变行业规则的顶尖技术[J]. 大飞机, 2018(6): 44-47.
- [3] 张绍江. 基于 Unity 的摄像机仿真操作系统的实现[J]. 天津科技, 2015,42(9): 65-66.
- [4] 唐梦菲, 陈瑶, 高建民. 基于 Unity 3D 的手势感应自动开关门衣柜设计及功能模拟[J]. 林业工程学报, 2020, 5(5): 172-176.
- [5] 黄蜜. 浅谈自动控制系统中控制电机的选用[J]. 科学与信息化, 2020(23): 145.
- [6] 李子旭, 窦文森, 李昊文, 等. 基于 LabVIEW 的可移动式打印机器人的设计和实现[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(9): 68-71.
- [7] 李家沛, 邱振宇, 陈佳峰. 微机组秤准确度等级判断的简要分析[J]. 衡器, 2018, 47(12): 21-23.
- [8] 安世奇, 孙瑞. 多功能组合秤控制系统设计及优化算法研究[J]. 电子测量技术, 2019,42(7): 108-112.
- [9] 卢倩, 陈西府, 黄卫清, 等. 一种高精度大行程 2R1T 并联定位平台[J]. 仪器仪表学报, 2019,40(8): 148-157.
- [10] 赵佰秋, 孟立新, 于笑楠, 等. 多通道超声的双向单程伪距测量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 174-180.
- [11] 郭静, 缪茸. 网络通讯数据包截获与解析研究[J]. IT 经理世界, 2019, 22(10): 51-55.
- [12] 王瑜晨. 基于 Unity 3D 的桥梁 VR 仿真设计[J]. 中国新技术新产品, 2019(1): 17-18.
- [13] 孔雪卉. 基于 C# 的 MCU 程序在线下载系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2020,39(5): 143-147.
- [14] 程志祥. 基于 C# 的网络通信实现[J]. 电脑知识与技术, 2018(17): 31-32.
- [15] 陆冬青, 邱云明, 辛金强. 基于 Unity 的船舶操纵运动仿真[J]. 船舶工程, 2019(S2): 19-22.
- [16] 李俊龙, 郭仁春, 姜檬, 等. Unity 3D 中的最短旋转研究[J]. 无线互联科技, 2019, 16(20): 107-109.
- [17] 侯正航, 何卫平. 基于数字孪生的飞机装配状态巡检机器人的建模与控制[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(4): 981-989.

作者简介

孙国锋(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为机械设备虚拟化仿真。

E-mail: 2577680900@qq.com

丁金华, 硕士研究生导师, 教授, 主要研究方向为机械设备虚拟化仿真和仪器仪表自动化。

E-mail: 342012450@qq.com